

視覚・聴覚的方法による疲労測定に関する実験的研究

青地 克頼^{*1} 藤岡 幸枝^{*2} 近藤 暉^{*3}

An Experimental Study on Fatigue Measurement Using Flicker Fusion and Auditory Methods

AOCHI, Katsuyori, FUJIOKA, Yukie and KONDOU, Susumu

要旨

本研究は疲労測定法について従来から周知されている視覚によるフリッカー測定値に加え、新しい理論に基づく聴覚による2音融合値を用いた測定値を導入することで、疲労測定値の特性を捉えようと試みた実験的研究である。作業負荷としては単純加算作業を連続20分間行った。作業負荷の前後で疲労測定をした。結果として作業負荷後フリッカー値が低下し2音融合値が増加した。作業負荷前後のフリッカー値・2音融合値の差により4区分に分類し検討した。Ⅰ・Ⅲ区分は自覚的疲労度全体に対し手(腕)、Ⅱ区分(フリッカー値と2音融合値の両疲労測定で疲労耐性が低かった)は自覚的疲労度全体に対し精神的な疲労が関連していた。Ⅳ区分(フリッカー値と2音融合値の両疲労測定で疲労耐性が高かった)は自覚的疲労度全体に対し目・肉体的な疲労が関連していた。これらよりフリッカー値・2音融合値の複合的な判断は指標として有用であることが結論づけられた。

キーワード

疲労測定法, フリッカー測定値, 音融合測定値, 自覚的疲労度

Abstract

This experimental study on fatigue measurement attempted to grasp the unique characteristics of fatigue by introducing the flicker test, a well-known visual test, and the two-tone acoustic fusion test, an auditory test based on a new theory. Stress was induced using 20 minutes of continuous simple arithmetic. Fatigue was measured (flicker and two-tone acoustic fusion values were measured) before and after stress. It was found that post-stress flicker values decreased, whereas post-stress two-tone acoustic fusion values increased. Based on the differences in flicker and the two-tone acoustic fusion values before and after workload, we classified the subjects into 4 categories and examined fatigue characteristics. The results of categorical regression analysis showed that subjective fatigue as a whole was related to fatigue in hand (arm) in categories I and III. In category II subjective fatigue as a whole was related to mental fatigue (flicker and two-tone acoustic fusion values revealed low fatigue resistance). In category IV subjective fatigue as a whole was related to eye and physical fatigue (flicker and two-tone acoustic fusion values revealed high fatigue resistance). It was concluded that combined judgment with both flicker and two-tone acoustic fusion values is useful.

Key words

Fatigue measurement methods, Flicker value, Acoustic fusion value, Subjective fatigue

Ⅰ. 緒言

疲労の研究においては、さまざまな側面から検討がなされてきた。近年では疲労測定法は自律神経系の測定項目である心拍変動を用い、低周波成分パワーおよび高周波成分パワーに変換しスペクトル解析による、交感神経系と副交感神経系のバランスをもって評価するものが主流となってきた。交感神経系の優位な状態(緊張)が続き、副交感神経系の機能が低下した状態が継続すれば「疲労」または「ストレス」と判断するものである。

本研究で測定したフリッカー検査とは、光を高速で点滅させた時、光のちらつきが目で判別できるか、できないかの境目の周波数を測る検査で一般的なものである。過去の文献では、吉

竹(1972)によればフリッカー値のような客観的機能検査と「疲労」の主観的側面である自覚症状は自ずから意味の違うものと解するべきであり、一日の作業前と作業後のフリッカー値の変動率と自覚症状である、頭が重い、肩がこる、腰が痛い、息苦しい、口がかわく、声がかすれる、めまいがする、まぶたや筋肉がピクピクする、手足がふるえる、気分が悪いなどは、フリッカー値と有意な相関は認められなかったと報じている。これらの自覚症状はある程度病的な領域に関係が深いと思われ、今回われわれは直観的に判断できる疲労の自覚項目を用いた。また比較的軽度の過労や病的な状態に至っていない一過的な疲労負荷、及びその測定法に着眼した。また従来から作業疲労の評価

*1: 聖徳大学人間栄養学部人間栄養学科・准教授 / *2: 聖徳大学人間栄養学部人間栄養学科・助手 /

*3: 広島修道大学経済学部経済情報学科・名誉教授

として用いられて来た、視覚からの情報に依存するフリッカー値を測定した。さらに多面的に疲労を測定することを目的とし、視覚による疲労測定も合わせて行った。過去においては、S.W. Davis(1955) は聴覚による疲労測定を行っており、聴覚は視覚よりも時間経過において鋭敏に反応すると報じている。聴覚による疲労測定は、近藤 (1993) によればVDT作業における2音融合値とフリッカー値の比較では、変動率はフリッカー値の方が大きく眼精疲労が疑われると報じており、両測定を併用することは意義があるとしている。それゆえに今回聴覚方式による2音融合値の測定を併用することで疲労測定精度の向上、及び解釈の広がりを検討した。一般に人間は情報量の多くを視覚から得ているが、眼筋はタイプⅡ筋線維が多く情報を素早く捉えることができる反面、疲労耐性は低いと言われている。境ら (1999) は七宝焼き製作時における細かい作業がフリッカー値を低下させたと報じており眼精疲労をその原因としている。眼精疲労がフリッカー値に影響を与えるとすれば、フリッカー値と2音融合値の併用は有意義であることになる。そこで、X軸にフリッカー値の変動、Y軸に2音融合値の変動を用いることによって2次元的に疲労測定値を検討し報告することを本研究の目的とした。

Ⅱ. 方法

1. 研究のデザイン

従来から用いられたフリッカー測定は、光を50回/secで点滅すると連続光に見え、30回/secで点滅すると、ちらつきとして知覚され、この点滅域をフリッカー値として表す。一般的な測定では回転数を上げていき連続光に見える測定をUP、逆に回転数を下げていき点滅が見える測定をDOWNとする。これを1サイクルとして数回反復測定する。一般に疲労が高ければフリッカー値は下降する。

一方、今回新たに導入した2音融合測定概念を示した(図1)。一般的に第1音(A)から第2音(B)まで音を聴取した場合、その間隔が近くなれば聴覚は1音に判断する。今回利用した2音融合測定器は、第1音と第2音の時間間隔(T)を拡げていくことでそれらは2音に聞こえ始める。また逆に完全に離れて聞こえる2音の状態から時間間隔(T)を狭めていくと1音に近い状態になる。1音から2音に聞こえ始めたところを2音融合臨界値(以下2音融合値)とした。作業負荷前にフリッカー測定と2音融合測定を行い1回目の疲労測定とした。次に単純加算作業を20分間行い、その直後に2回目の疲労測定を同様に作業負荷後の測定値とした。今回の実験では、フリッカー値・2音融合値とも、まずUPを測定し次にDOWNを測定した、UPとDOWNの平均値を測定値とした。そして1回目と2回目の平均値をもって、フリッカー測定値、2音融合測定値とした。

2. 被験者への疲労測定についての指導

学生に対する測定上の指導については、実験の意義、原理について最小限度の説明を施した。結果をよく見せようというバイアスが働かないように、フリッカー値及び2音融合値の疲労の傾向については、あえて説明をしなかった。フリッカーについては点滅が連続光となる方向をUP、連続光が点滅に移行する方向をDOWNとし、必ずUP測定の後にDOWN測定を行い、2サイクル行うことを説明した。2音融合値については、音が離れていく方がUPであり、逆に音が接近する方がDOWNでありPC制御のもとヘッドホンを装着し聞きやすい音量で行うように指導した。2回とも作業負荷の前後で測定したが、前後の記録用紙を分け、作業負荷後の測定時に作業負荷前の測定結果が目に触れないように考慮した。また作業負荷の前と後では同装置により測定を行うように指示した。

3. 被験者への単純加算作業についての指導

作業負荷である単純加算作業については、学生に内田クレペリン検査用紙を配り、十分な作業スペースを確保したうえで、必要事項(測定日時、番号、氏名)を記入させ(他の学生との区別のためであるので回収はしなかった)、単純加算作業における足し算の仕方、記入の仕方の説明をした。次にこちらで一斉に「用意始め」と口頭で指示し時間を60秒間計測し「やめ」の合図で1回練習を行った。用紙を測定記録欄に変え、練習と同様の合図で1分ごとに区切り連続して20回、計20分の単純加算作業を行わせた。この時の作業量が減ると負荷がかからないとの予備実験の結果に基づき、後ほど作業量の集計を行う等の説明を行い精一杯計算するように指示した。

4. 疲労自覚アンケート

また作業負荷直後に自覚的疲労度を自己記入式アンケートにより収集した。アンケートの項目はなるべく単純に取り扱える項目とし、全体・肉体的・精神的・目・手(腕)の5項目について5段階で示すものにした。疲労の自覚について最小の1、最大の5を両端とした軸線上に2, 3, 4に該当する刻みを付け、刻み上に○を付けさせるものとし、スケールはデジタルスケールとした。

5. 測定機器および測定日

竹井機器製フリッカー値測定器Ⅱ型(TKK501c)ならびに東京情報科学研究所製聴覚式疲労測定ソフト(特許6429298号)を用いあらかじめPCにインストールし、平成29年4月29日に75名、平成29年10月2日に68名、平成30年4月24日・25日に71名の計214名について本学科の公衆衛生学実習(3年生)授業内で行った。さらに疲労の自覚について質問紙により回答を得た。作業負荷の前後のデータ・疲労自覚アンケートの回収によ

りすべて欠損がなく解析に利用できたデータは171名であった。

6. 解析ソフト

解析ソフトはIBM SPSS Statistics Ver.22.0によった。フリッカー値、2音融合値の変動については、対応のあるt検定、自覚的疲労度全体に対する各疲労要素の関係はスピアマンの正順位相関を行った。カテゴリカルな回帰分析については同ソフトモジュールCategories^{*1}：回帰分析：最適尺度法を用い、自覚疲労度全体を従属変数に、肉体的・精神的・目および手（腕）を説明変数として検討した。すべての統計的な有意水準は、 $p < 0.05$ とした。

7. 倫理的配慮

学生に本研究は成績に関係しないこと、データは研究の目的以外に使用しないことを説明し、調査協力については、測定、アンケート用紙の提出、同意書の提出をもって同意したものとみなし、未回収の物及び当日欠席の者については、追跡をしなかった。データは匿名化して解析し、その時点より撤回できないものとして扱った。本研究については、聖徳大学ヒューマンスタディ委員会「疲労測定装置の精度を高めるための基礎データ構築及び疲労科学実験的研究」H29U041で承認された。データの取り扱いについては、倫理基準に従った方法で処理された。

Ⅲ. 結果

作業負荷の前後における、対応のある t 検定の結果フリッカー値及び2音融合値の平均値の変化を示した。作業負荷前のフリッカー値は $34.9 \pm 4.2\text{Hz}$ 、作業負荷後のフリッカー値は $34.1 \pm 4.1\text{Hz}$ 、[t 値=4.08、自由度170、危険率・両側 (0.001)]に低下した。作業負荷前の2音融合値は $18.7 \pm 6.1\text{msec}$ 、作業負荷後の2音融合値は $19.7 \pm 6.0\text{msec}$ 、[t 値-2.68、自由度170、と危険率・両側 (0.008)]に増加した。作業負荷前値—作業負荷後値の平均値は、フリッカー値 $0.73 \pm 2.32\text{Hz}$ 、2音融合値 $-1.02 \pm 4.99\text{msec}$ であった。作業負荷前後のフリッカー値と2音融合値の差の相関は $R = -0.192$ 、 $p = 0.012$ であった。(表1)フリッカー値・2音融合値の作業前後値の差の散布図を示した。

作業負荷前を基準にフリッカー値と2音融合値の負荷後の変化で分類を行い、フリッカー値の前後値の差が(+)、前後値差が(-)、2音融合値の前後値の差が(+),前後値の差が(-)とし、フリッカー値(+).2音融合値(+)をⅠ区分、フリッカー値(-).2音融合値(+)をⅡ区分、フリッカー値(-).2音融合値(-)をⅢ区分、フリッカー値(+).2音融合値(-)をⅣ区分の4区分に分類した。(図2)自覚的疲労における全体と各疲労要素(肉体的・精神的・手(腕)・目)の関係を、それぞれの区分ごとにスピアマンの相関分析した結果、Ⅰ区分 $n=43$:肉体的 $\rho = 0.444$ ($p = 0.003$)、精神的 $\rho = 0.436$ ($p = 0.003$)、

手(腕) $\rho = 0.309$ ($p = 0.043$)、目 $\rho = 0.200$ ($p = 0.199$)、Ⅱ区分 $n=29$:精神的 $\rho = 0.756$ ($p = 0.001$) 目 $\rho = 0.420$ ($p = 0.023$) 肉体的 $\rho = 0.414$ ($p = 0.026$)、手(腕) $\rho = 0.350$ ($p = 0.063$)、Ⅲ区分 $n=38$: 精神的 $\rho = 0.683$ ($p = 0.001$)、手(腕) $\rho = 0.666$ ($p = 0.001$)、肉体的 $\rho = 0.459$ ($p = 0.004$) 目 $\rho = 0.274$ ($p = 0.096$)、Ⅳ区分 $n=61$: 肉体的 $\rho = 0.639$ ($p = 0.001$)、目 $\rho = 0.506$ ($p = 0.001$)、精神的 $\rho = 0.380$ ($p = 0.002$)、手(腕) $\rho = 0.295$ ($p = 0.021$) であった。(表2)

自覚的疲労度全体と各疲労要素の関係をそれぞれの区分ごとに、カテゴリカルな回帰分析にて分析した結果、自覚的疲労度全体を従属変数、各疲労要素(肉体的・精神的・手(腕)・目)を説明変数とした。Ⅰ区分 ($n=43$): 重相関係数 $R = 0.792$ 、F値=5.380、手(腕): 標準化 β 係数=0.629 ($p = 0.035$)、目: 標準化 β 係数=0.343 ($p = 0.148$)、精神的: 標準化 β 係数=0.304 ($p = 0.230$)、肉体的: 標準化 β 係数=0.238 ($p = 0.501$)、Ⅱ区分 ($n = 29$): 重相関係数 $R = 0.805$ 、F値=4.602、精神的: 標準化 β 係数=0.696 ($p = 0.040$)、手(腕): 標準化 β 係数=0.242 ($p = 0.575$)、肉体的: 標準化 β 係数=0.110 ($p = 0.826$)、目: 標準化 β 係数=0.066、($p = 0.998$)、Ⅲ区分 ($n=38$): 重相関係数 $R = 0.851$ 、F値=6.210、手(腕): 標準化 β 係数=0.389 ($p = 0.048$)、精神的: 標準化 β 係数=0.389 ($p = 0.090$)、肉体的: 標準化 β 係数=0.248、($p = 0.387$)、目: 標準化 β 係数=0.194、($p = 0.241$)、Ⅳ区分 ($n = 61$): 重相関係数 $R = 0.815$ 、F値=11.234、目: 標準化 β 係数=0.496、($p = 0.001$) 肉体的: 標準化 β 係数=0.453 ($p = 0.002$) 精神的: 標準化 β 係数=0.133 ($p = 0.600$)、手(腕): 標準化 β 係数=0.104 ($p = 0.645$) であった。なおフリッカー値(Visual Fusion): VF、2音融合値(Auditory Fusion): AFとした。(表3)

Ⅳ. 考察

従来から疲労測定で利用されている視覚によるフリッカー測定値に加え、聴覚による2音融合値を用いた測定値を導入することで、疲労測定値の特性を捉えようと試みた結果、フリッカー値は有意に低下した。これに関しては周波数の低い方から高い方に、点滅から連続光への識別閾値が低下しており、疲労が認められたと判断される。また2音融合値については上昇した。2音融合値については離れている2音が近づいてきた時の、識別閾値が低下したことで疲労が認められたと判断される。前述のS.W. Davis(1955)は、2音融合値における測定は、視覚によるフリッカー測定値よりも測定における正常な変動の中でのバラつきが大きいことを示している。今回のわれわれの研究でも同様の結果が得られ、作業負荷前後のフリッカー値の変動係数は3.17、作業負荷前後の2音融合値の変動係数は4.89であった。フリッカー値と2音融合値の作業負荷前後の相関が認められたことで、従来から確立され利用されてきたフリッカー

測定器と今回導入した2音融合値が評価できるものと判断された。単純加算作業負荷としてはクレペリン検査用紙を用い単純計算作業を連続20分間行った。本来であれば15分の負荷を休憩を挟み2度行うことで心理検査の目的で開発されたものであるが、今回は単純加算作業負荷の手段として用いた。疲労における作業負荷の先行研究として、後藤（2007）によれば内田クレペリン検査を15分間行くと、十分に精神的に疲労すると報じている。しかしわれわれは、予備実験に基づき被験者の覚醒レベルを考慮し1分ずつ区切り連続20分の負荷とした。また、疲労自覚の項目について出村（2007）は疲労の自覚的評価は主観的であり、ストレスの反応として疲労を捉えると身体的疲労と精神疲労の分類はあまり意味をなさない指摘しており3つ以上の概念因子が必要と報じている。今回の疲労自覚のアンケートは近藤（2007）数量化理論で分析の対象とする要因としての自覚疲労度の程度より引用、一部改変したものを利用した。今回われわれは、自覚的な全体という概念を使った回帰分析を用い、肉体的・精神的・目・手（腕）について検討した。疲労の自覚については、今後の検討として項目の選択や共分散構造分析などでそれぞれの関係を検討しなければならないと思われる。

表2より、Ⅱ・Ⅲ区分についてはフリッカー値がマイナスに移動した区分で精神的な疲労自覚が0.756、0.683と高く一般的なフリッカー値の特性を表していると思われる。Ⅰ・Ⅱ区分については2音融合値がプラスに移動した区分であるが、Ⅰ・Ⅱ区分について共通した特性は表れなかったことより、測定精度の問題が残っている可能性があると思われる。Ⅳ区分については、肉体的な疲労自覚が0.639で高いが自覚的評価が主観的であることを表している可能性は否定できない。

表3より、カテゴリーカルな回帰分析の結果では、全体を従属変数として分析した結果、Ⅰ・Ⅲ区分においては説明変数として手（腕） $\beta = 0.629$ ・ $\beta = 0.389$ 、Ⅱ区分では説明変数として精神的 $\beta = 0.696$ 、Ⅳ区分においては説明変数として目 $\beta = 0.496$ 、肉体的 $\beta = 0.453$ であった。フリッカー値・2音融合値による疲労測定値の上昇したものは、全体疲労の自覚に精神的要素が高く評価されている。今回疲労負荷のために用いたクレペリン検査はこの測定条件の中で手（腕）、肉体的、目ではなく精神的に負荷がかかっているのではないかと判断された。前述の後藤（2007）のクレペリン検査が精神的疲労の発現を起こすと報じた文献と一致した結果となった。またフリッカー値・2音融合値による疲労測定値の低いものは、全体疲労の自覚に目・肉体的な要素が高く評価されている。目や肉体的な自覚疲労は比較的表面的な要素ではないかと推測される。

4区分を用いたことで疲労自覚の判断をより明確に表現できたことで、フリッカー値・2音融合値の複合的な判断は、有用であることが示唆された。

今回の研究の限界としては、疲労の自覚のアンケートが負荷

後の1回のみであり、疲労負荷による疲労自覚の変化を捉えられなかったことが挙げられる。

今後の課題と研究の方向性としては、橋本ら（1995）によればフリッカー検査は脳皮質機能の活動水準を反映する指標とされ、明確なサーカンディアリズムを示すことが知られていると報じている。前述の近藤（1993）は2音融合値による疲労測定値はフリッカー測定値と反位相傾向を示し周期的変動を伴っていると報じている。安部（1994）はフリッカー値と自覚疲労状態の関係は交感神経系の緊張支配である昼間の時間帯では、夜勤などに比べ顕著に表れにくいと報じている。これらより今回の測定は授業内の測定であったため、午前2クラス午後4クラスであった。Ⅳ区分に分類した時点での人数も十分ではなかったと思われ、測定時間や測定人数の問題で今後の検討課題として残された。ある意味では午前クラスと午後クラスの影響で日内変動がフラットにされた可能性も否定できないが、時間的な疲労変動なども考慮し検討しなければならないと思われる。

引用文献

- 吉竹博, 疲労自覚症とフリッカー値の相関, 労働科学, Vol.48, No.2, (2007.13), 69-75
S.W. Davis, Auditory and Visual Flicker-Fusion as Measures of Fatigue. The American Journal of Psychology 68: (1955) 654-657
近藤暹, 2音融合値による疲労の測定と分析—特にフリッカー値と比較して—, 民族衛生, Vol.59, No.2, (1993), 59-68
境信哉, 村井真由美, 青山宏, フリッカー値による作業負荷の評価—七宝焼きとアンデルセン手芸の比較—, 山形保健医療研究, No.2, (1999), 51-54
後藤靖宏, インテリアによる精神的疲労および肉体的疲労の低減効果の検証, 北星論集 (文), Vol.44, No.2, (2007), 13-23
出村慎一, 体育学における疲労自覚症の尺度評価, 体育学研究, Vol.52, (2007), 303-314
近藤暹, 疲労を測る, 杏林書院, 2007
橋本邦衛, 深野重次郎, 昼夜転倒実験における生理的諸機能の変動について, 鉄道労働科学, No.6, 1-52, 1955
安倍和則, 自覚疲労症状訴え率とフリッカー値の相関関係, 一看護婦における検討事項—, 長野短期大学紀要, No.99 (1994), 21-25

※1: Catreg Version 3.0 by Data Theory Scaling System Group (DTSS)
Faculty of Social and Behavioral Sciences Leiden University, The Netherlands

表 1. 作業負荷前後のフリッカー値・2音融合値の変化

n=171

	作業負荷前			作業負荷後			△作業負荷前後	△作業負荷前後の相関				
	ME	±	SD	ME	±	SD	p Value	ME	±	SD	R	p Value
フリッカー値（Hz）	34.9	±	4.2	34.1	±	4.1	0.000	0.73	±	2.32	-0.192	0.012
2音融合値（msec）	18.7	±	6.1	19.7	±	6.0	0.008	-1.02	±	4.99		

表 2. 自覚的疲労度全体と各疲労要素の関係

スピアマン正順位相関

		ρ	p Value
VF値 (+)AF値 (+) I (n=43)	肉体的	0.444	0.003
	精神的	0.436	0.003
	手 (腕)	0.309	0.043
	目	0.200	0.199
VF値 (-)AF値 (+) II (n=29)	精神的	0.756	0.001
	目	0.420	0.023
	肉体的	0.414	0.026
	手 (腕)	0.350	0.063
VF値 (-)AF値 (-) III (n=38)	精神的	0.683	0.001
	手 (腕)	0.666	0.001
	肉体的	0.459	0.004
	目	0.274	0.096
VF値 (+)AF値 (-) IV (n=61)	肉体的	0.639	0.001
	目	0.506	0.001
	精神的	0.380	0.002
	手 (腕)	0.295	0.021

フリッカー値 (Visual Fusion) : VF

2音融合値 (Auditory Fusion) : AF

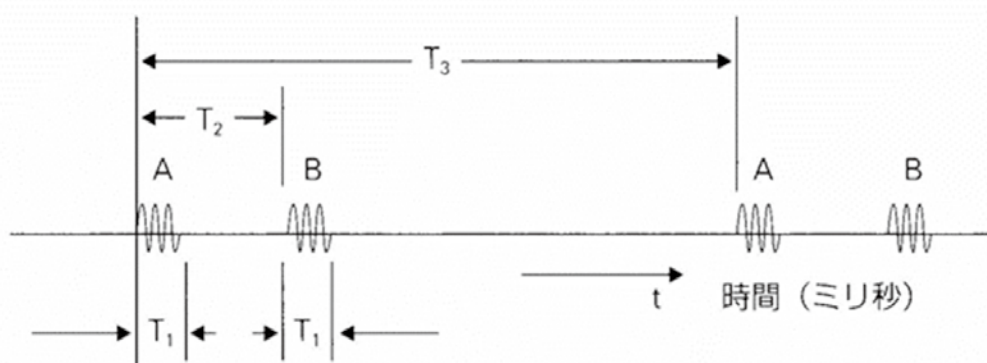
表 3. 自覚的疲労度全体と各疲労要素の関係

カテゴリカル回帰分析

		重相関係数 (R)	F値	標準化 β 係数		p Value
VF値 (+)AF値 (+) I (n=43)		0.792	5.380	手 (腕)	0.629	0.035
				目	0.343	0.148
				精神的	0.304	0.230
				肉体的	0.238	0.501
VF値 (-)AF値 (+) II (n=29)		0.805	4.602	精神的	0.696	0.040
				手 (腕)	0.242	0.575
				肉体的	0.110	0.826
				目	0.066	0.998
VF値 (-)AF値 (-) III (n=38)		0.851	6.210	手 (腕)	0.389	0.048
				精神的	0.389	0.090
				肉体的	0.248	0.387
				目	0.194	0.241
VF値 (+)AF値 (-) IV (n=61)		0.815	11.234	目	0.496	0.001
				肉体的	0.453	0.002
				精神的	0.133	0.600
				手 (腕)	0.104	0.645

フリッカー値 (Visual Fusion) : VF

2音融合値 (Auditory Fusion) : AF



疲労の聴覚的測定実験に用いた 2 つの刺激音 A, B とその時間的構成

T_1 : 刺激音継続時間, 実験時 20 ミリ秒に固定

T_2 : 刺激音遅延時間, 実験時 20~50 ミリ秒で可変 (被験者が操作)

T_3 : 刺激音繰り返し時間, 実験時 1 秒に固定

A と B はともに 2 KHz の正弦波.

図 1. 2音融合測定概念図

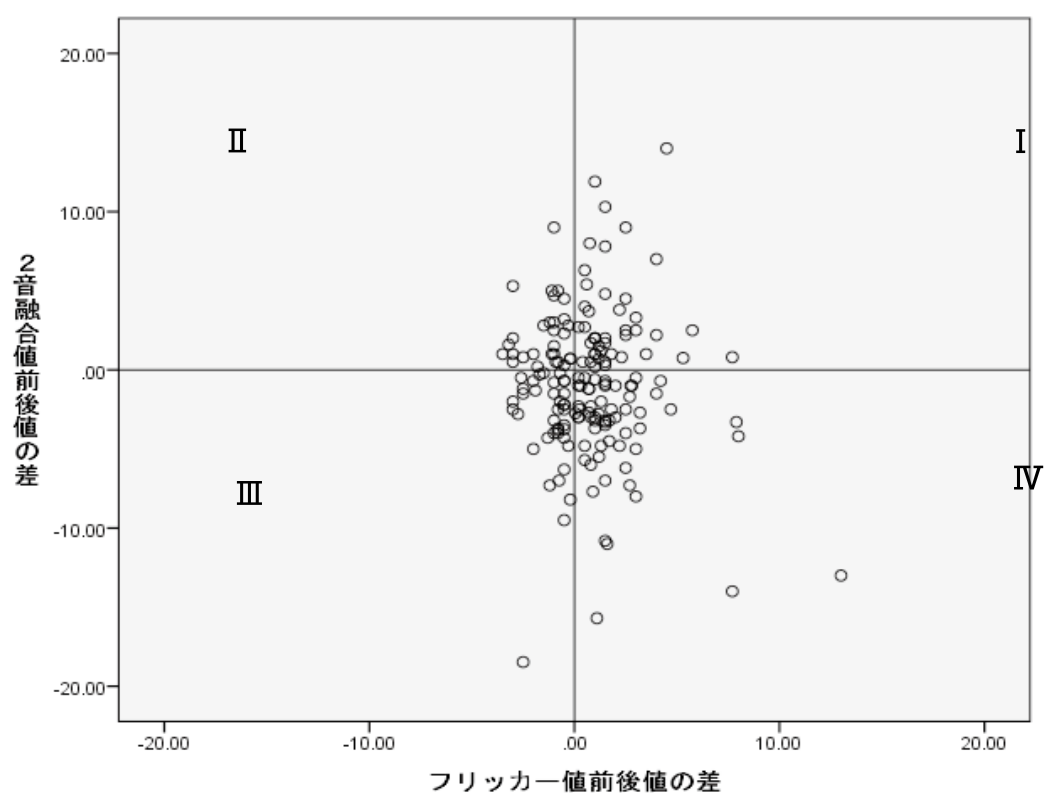


図2. フリッカー値・2音融合値の作業前後値の差